

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.10.020

脑科学与神经物理

脑电在脑卒中运动功能评估中的应用研究进展

王冲¹, 周静², 李文豪³, 陈虎城¹, 陈泽斌¹, 邓泽亚⁴, 陈铭湘⁵, 吴凯^{6,7,8}

1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528200; 2. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510006; 3. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510006; 4. 广州双悠生物科技有限责任公司, 广东 广州 510535; 5. 广州互云医院管理有限公司, 广东 广州 510030; 6. 华南理工大学生物医学科学与工程学院, 广东 广州 511442; 7. 广东省精神疾病转化医学工程技术研究中心, 广东 广州 510370; 8. 广东省老年痴呆诊断与康复工程技术研究中心, 广东 广州 510500

【摘要】脑电(EEG)作为一种非侵入式、低成本检测大脑皮层神经电位手段,能够反映大脑的神经功能活动,目前被广泛应用于脑卒中患者运动功能评估的研究中。通过EEG研究脑卒中患者的运动功能状态及其神经机制,有助于理解脑卒中的神经及康复机制,实现患者损伤严重程度和康复效果的个体化预测。本文首先概述了EEG的分析流程及方法,从皮质振荡活动、量化EEG、脑功能连接等3个方面,总结EEG在脑卒中患者运动功能评估中的应用研究进展,并从EEG技术优势、康复效果评价、临床辅助决策等3个方面进行讨论,最后对未来的发展方向进行展望。

【关键词】脑电; 脑卒中; 运动功能评估; 综述

【中图分类号】R318; R743.3

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)10-1309-07

Application of electroencephalography in assessment of motor function in stroke patients: a review

WANG Chong¹, ZHOU Jing², LI Wenhao³, CHEN Hucheng¹, CHEN Zebin¹, DENG Zeya⁴, CHEN Mingxiang⁵, WU Kai^{6,7,8}

1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528200, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. Brain Power System Co., Ltd, Guangzhou 510535, China; 5. Hu Yun Hospital Management Co., Ltd, Guangzhou 510030, China; 6. School of Biomedical Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China; 7. Guangdong Engineering Technology Research Center for Translational Medicine of Mental Disorders, Guangzhou 510370, China; 8. Guangdong Engineering Technology Research Center for Diagnosis and Rehabilitation of Dementia, Guangzhou 510500, China

Abstract: Electroencephalogram (EEG), as a non-invasive and low-cost means to detect cerebral cortical nerve potential, can reflect the neural activities of the brain, and is currently widely used in the assessment of motor function in stroke patients. The analysis on motor function and neural mechanism of stroke patients through EEG signals is helpful to understand the related neural and rehabilitation mechanisms, and to realize the individualized predictions of injury severity and rehabilitation outcome. The study outlines the EEG signal analysis process and methods, and summarizes the research advances in the application of EEG in the assessment of motor function in stroke patients from the aspects of cortical oscillatory activity, quantitative EEG, and functional brain connectivity. The advantages of EEG technology, the evaluation of rehabilitation outcome, and clinical assistant decision-making are also discussed. Finally, an outlook on the future development is provided.

Keywords: electroencephalogram; stroke; motor function assessment; review

【收稿日期】2023-03-12

【基金项目】国家自然科学基金(72174082, 82271953); 广东省科技重点领域研发计划(2020B0101130020); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金杰出青年项目(2021B1515020064); 广州市科技计划项目(201903010032, 202103000032, 202206060005, 202206080005, 202206010077, 202206010034); 广东省普通高校重点实验室项目(2020KSYS001)

【作者简介】王冲, 硕士, 主要研究方向: 脑电信号分析处理、人工智能, E-mail: 1342402179@qq.com

【通信作者】吴凯, 教授, 研究方向: 神经影像、智能医疗器械、智能医疗系统等, E-mail: kaiwu@scut.edu.cn

前言

脑卒中俗称“中风”，是一种因脑部血管突然破裂或血管阻塞引起供血不足，进而导致脑组织受损的急性脑血管疾病。脑卒中在我国发病率呈逐年递增的趋势，是我国居民致残、致死的首位病因，且70%~80%以上幸存人群伴有不同程度的运动功能障碍^[1-3]。有效的康复训练对脑卒中后大脑功能的重塑以及对运动能力的改善至关重要^[4]。在运动功能恢复过程中，神经可塑性和组织重组等事件会干预大脑受损和非受损区域，这些过程与患者的功能改善和康复程度密切相关^[5]。Fugl-Meyer 评表 (Fugl Meyer Assessment Scale, FMA) 是脑卒中患者运动功能评估的常用方法^[6]，但严重依赖于评估人员的技能水平和经验，容易受主观判断影响。近年来，大量研究采用生理信息定量化分析方法，客观评价脑卒中患者的运动功能水平。

目前，脑卒中运动功能评估的技术主要包括功能性磁共振成像 (functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)^[7]、近红外光谱 (Near Infrared Spectrum Instrument, NIRS)^[8]、脑电 (Electroencephalogram, EEG)^[9]、肌电 (Electromyogram, EMG)^[10] 以及脑磁图^[11] 等。其中，EEG 可以记录大脑皮层的电势变化，反映皮质激活程度和大脑的神经功能活动，具有非侵入、时间分辨率高、便携、成本低等优点，被广泛应用于运动功能评价的研究中^[12]。

本文针对 EEG 在运动功能评估中的应用进行综述，首先对 EEG 的分析流程及方法进行概述，从皮质振荡活动、定量化 EEG 指标、脑功能连接等 3 个方面，综述脑卒中运动功能评估的研究进展，最后对未来的发展方向进行展望。

1 EEG 的分析与处理

EEG 是一种由头皮表面记录到的大脑神经元细胞群自发性、节律性的电生理活动信号^[13]，其中包含了大量的生理与疾病信息，通过 EEG 的定量化分析，有助于理解脑卒中患者大脑的功能状态和康复机制。EEG 一般分析流程如图 1 所示。

1.1 信号采集

EEG 采集常采用国际标准的 10-20 系统^[14]，采用非侵入式表面电极，在头皮表面记录被试静息状态或任务状态下的 EEG，采集过程无创且方便，但信噪比较低、易受外界环境影响。

1.2 预处理

EEG 具有频率低、幅值小、随机强、非平稳等特点，极易被无关噪声所污染，从而形成各种非大脑神

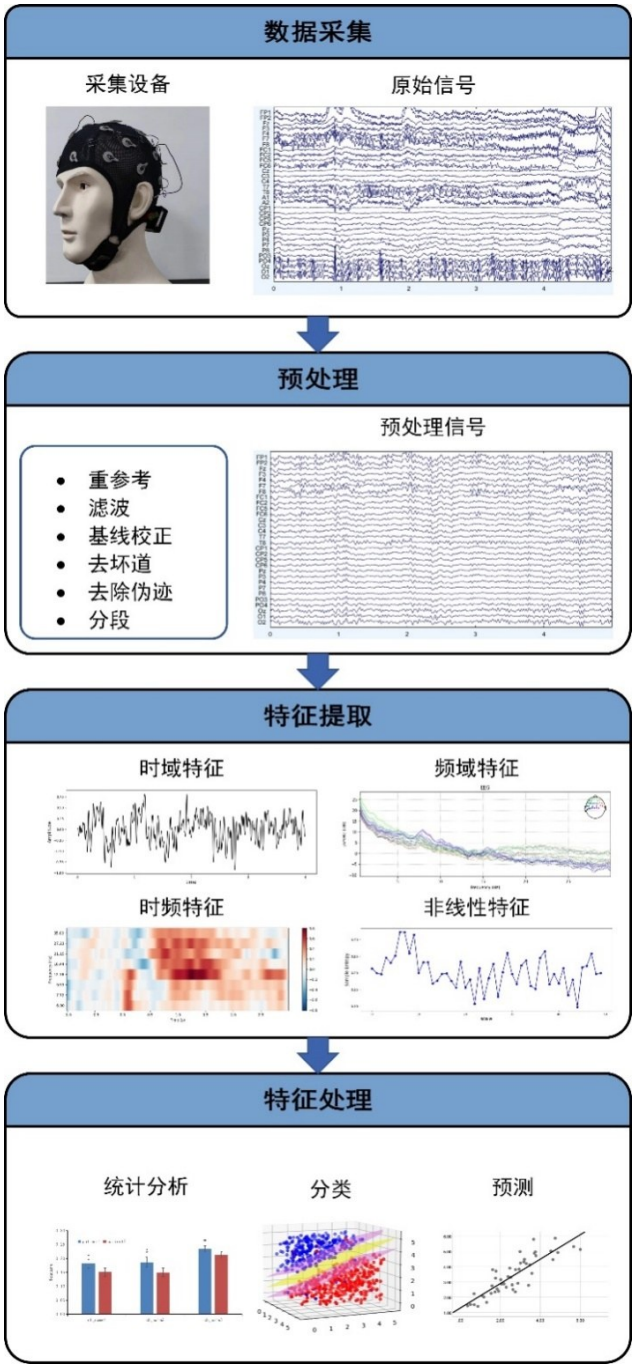


图1 脑电信号分析与处理流程
Figure 1 Electroencephalogram analysis and processing process

经活动的伪迹^[12]。EEG 伪迹大致分为生理伪迹和非生理伪迹两类，生理伪迹通常是身体其他部位的活动造成的，如眼电伪迹、肌电伪迹、心电伪迹等，而非生理伪迹则是由设备性能以及环境等因素产生。因此，为减小伪迹或噪声对真实 EEG 的影响，需对数据进行预处理和降噪，常用的去伪迹方法主要有主成分分析、独立成分分析等盲源分离方法^[15]；共空间模式和拉普拉斯等空间滤波器^[16]；小波分解以及样条插值等运动伪迹去除方法^[17]。为满足 EEG 的一些实时性的应用，Chang 等^[18]证明了子空间重构 (Artifact

Subspace Reconstruction, ASR)可以成为一种有效的自动在线伪迹去除方法,并且找到ASR的最佳参数区间,可实现临床检测和脑机接口等方面的实时伪迹抑制。

1.3 特征提取

经过预处理后的EEG,数据量大、纬度高,且不能直观体现蕴含的信息,需进行特征提取,以寻找与病理相关的EEG特异性。传统的特征提取方法包括初级运动皮层的斜率、峰值等时域分析方法^[19],功率谱估计、AR参数模型谱估计以及基于频谱分析的平均功率、相对功率、频谱峰值等频域分析方法^[20],小波变换、希尔伯特黄变换等时频分析方法^[21],熵、复杂度等非线性分析方法^[22]。近年来有关脑功能连接、定量EEG(Quantitative Electroencephalography, QEEG)等分析方法也常用来研究大脑损伤和运动康复的情况,并取得较好的效果。

1.4 特征处理

随着人工智能技术的发展,机器学习、深度学习等技术能实现复杂信息的自动分类和个体化预测等任务,广泛应用于疾病的辅助诊断和精准医疗等^[23]。机器学习包括无监督学习和有监督学习两类,EEG的分类任务通常使用有监督学习的分类器,如支持向量机、K邻近算法、决策树以及随机森林等^[24]。机器学习算法模型框架基于统计概念构建,在理解变量之间的关系和适应低计算复杂度方面非常有效,但当遇到高度动态特征时,这类算法通常会导致较差的泛化行为和低分类性能。深度学习算法基于数据的多样化体系结构组成,包括卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)以及递归神经网络等^[25],能很好地适应大型数据集和高维数据的分类问题,但计算成本较高。因此,需根据不同的应用场景对算法进行选择使用。

特征处理除了可用于分类识别外,还可进行统计分析,用于描述与任务相关的EEG变化规律,进而反映大脑状态。其一般思路为:首先对样本数据进行正态性或方差同质性检验,再根据检验的结果选择相应的分析方法进行相关性检验或显著性检验。

2 脑卒中运动功能评估方法

脑卒中会造成大脑神经及结构功能受损,导致患者运动功能出现障碍,EEG能反映大脑皮质激活程度和神经功能状态,被广泛应用于脑卒中的神经及康复机制的研究。现有的评估方法主要集中在皮质振荡活动、定量化EEG指标、脑功能连接等3种分析方法。

2.1 皮质振荡活动分析

运动康复训练能够使运动功能恢复,其主要机制是神经可塑性,包括大脑皮质的改变和大脑中神经通路兴奋性的变化^[26]。研究表明,运动相关皮质电位(MRCP)和事件相关同步化(ERD)/事件相关去同步化(ERS)可用于量化脑卒中运动学习中神经可塑性的变化^[27],进而反映运动功能的水平^[28]。

2.1.1 MRCP MRCP是人体在执行提示性或自主性运动时,调用大脑中与运动相关的认知资源时所产生的慢性皮质电位,与自定节奏的运动以及基于线索提示所产生的运动规划和执行有关^[29]。与健康成年人相比,脑卒中患者在运动准备和表现方面有所不同。脑卒中患者在运动时的MRCP持续时间更长、振幅更大,且MRCP的变化与肢体运动能力之间存在显著关联^[30]。Peters等^[31]验证了上肢手臂的运动功能与MRCP的相关性,手臂功能越好,对应的振幅越小,持续时间越久,脑卒中患者手部恢复后MRCP振幅和持续时间降低。Yilmaz等^[32]发现在运动准备和执行过程中,仅皮质下和混合(皮质和皮质下)脑卒中患者的MRCP之间存在显著差异。针对以上规律,可以对不同程度的脑卒中患者与健康被试之间做出有效区分。在对运动信息的解码中,Jochumsen等^[16]使用不同空间滤波器和多种特征组合方法,对健康被试和中风患者踝关节背屈运动的过程进行区分,能够达到最佳的80%的分类效果。Xu等^[33]利用MRCP成功对3种动作类型和运动学信息进行解码,在4种不同的运动学条件下,分别对手部运动类型进行区分,得到二分类和三分类的平均峰值精度分别为83.44%和73.83%。

2.1.2 ERD/ERS ERD/ERS是运动事件引起大脑皮质振荡活动的能量变化。当进行实际运动或运动想象时,在感觉运动皮层产生的 μ 节律和 β 节律的能量会降低,称为ERD;而在大脑处于闲置状态时, μ 节律和 β 节律的能量会升高,称为ERS^[34]。根据ERD/ERS的特性,通过对其量化可以描述运动期间大脑反应的变化,进而描述可塑性的变化。Bartur等^[35]发现受影响半球的高 μ 和低 β 频段的ERD振幅大小与标准临床试验测量的上肢运动功能显著相关,且振幅与因中风造成的大脑损伤程度呈现负相关。鉴于这种相关性,在上肢运动恢复期间对ERD的纵向评估具有预测恢复情况的价值。ERD的空间分布存在差异,如在执行左手或者右手的运动想象时,具有明显的对侧ERD,在进行双手的运动想象时,会产生双边ERD。Chen等^[36]对实际运动和运动想象任务形式的感觉运动节律进行对比,发现运动障碍可能与运动想象任务中的ERS和运动尝试任务中的ERD更相

关。在运动想象任务期间引起的皮层兴奋性变化与实际运动产生的兴奋性变化相似^[37]。由于大脑的可塑性以及与运动相关脑区激活的关系,由脑损伤导致运动障碍的患者可通过运动想象来重新建立受损的运动传导通路,增强和重建相应脑区的神经元活动,实现运动康复的目的。

由此可见,MRCP和ERD/ERS能够对脑卒中患者的皮质活动情况进行有效分析,也能够对患者与正常人的EEG异常特征进行有效区分,这将有助于对脑卒中运动障碍的神经病理机制的了解,提高对患者损伤的严重程度和恢复可能性的预测^[38-39]。

2.2 量化EEG分析

EEG的定量指标是一种经函数模型转化为各种量化参数的客观分析指标,如非线性参数、定量EEG等,具有表现患者运动功能的潜力,分析结果较传统量表评估更客观可靠。

EEG是大量神经细胞的非线性耦合,具有混沌和非线性特性。Rubega等^[40]发现脑卒中急性阶段的Higuchi分形维数和Tortuosity指数均显著降低,运动功能的降低反映出大脑活动的复杂性显著降低。Bing等^[41]发现非线性特征最大李雅普诺夫指数(Largest Lyapunov Exponent, LLE)与力量呈正相关,与疲劳度呈负相关,表明非线性混沌指数LLE可作为运动控制相关皮质信号适应的定量测量。这些非线性指数可作为追踪中风后早期行为变化的指标。

QEEG是一种新型的EEG生理学检测技术,它从EEG中提取定量特征,其参数显示出与不同病理的多种相关性,帮助临床医生了解患者的临床状态,是临床领域的重要工具^[42]。在以QEEG指标作为检测脑卒中运动功能恢复手段的研究中,Sebastian-Romagosa等^[43]发现,健康被试与患者之间的脑对称指数(Brain Symmetry Index, BSI)存在显著性差异,患者BSI与FMA呈显著负相关,横向系数(Laterality Coefficient, LC)与手部震颤情况、手部抓握能力、上下肢的FMA均显著相关,表明BSI与LC可以成为在中风后和康复期间评估功能障碍的有用参数。Trujillo等^[44]发现QEEG的功率比指数(Delta/Alpha Ratio, DAR)与治疗前后上肢FMA的变化之间存在显著的负相关($r=-0.77$, $P=0.009$)。另一项研究指出^[45],DAR在区分急性期的脑卒中患者和健康者之间取得较好的效果。文献[46-49]均验证了QEEG指标在评估脑卒中恢复情况方面的可行性,并对运动功能的恢复情况进行线性回归预测,表明中风早期测量的QEEG对恢复能力预测的可能性。

另外,一些研究也对其他的定量指标进行探索。

Zhang等^[50]利用CNN等深度学习方法建立EEG模型,实现EEG数据与运动功能评分的转化。Hoshino等^[51]使用功能连接(Functional Connectivity, FC)作为预测中风后上肢功能的恢复指标,发现FC与脑卒中后4周时的FMA评分呈负相关,并且使用脑卒中后4周FC来预测中风后8周FMA评分;此外,对下肢做了同样的分析,结论与上肢类似,功能连接强度与下肢运动功能恢复程度呈显著的相关性^[52]。

EEG的定量指标具有能够表现运动功能改善情况的潜力,能准确反映大脑过程并提供单一指标,这对临床医生来说更方便直观。其中PRI和DAR指数易于计算,解释相对简单,可成为中风后运动恢复的预后和监测定量指标。

2.3 脑功能连接分析

大脑是一个具有极其密集互连的网络,中风不仅会引起大脑局部损伤,脑组织坏死,而且还会影响脑网络结构,导致远离中风病变的连接区域产生异常^[53]。因此,中风相关的神经功能缺陷以及恢复情况与大脑网络的变化有着密切的关系。分析不同区域激活之间关系的研究通常采用两种方法:FC和有效连接(Effective Connectivity, EC)^[54]。功能连接主要观察大脑系统之间的非指向性时间关联,通常基于相关性或相位同步测量;有效连接侧重于追踪一个区域对另一个区域施加的因果影响,如格兰杰因果关系或动态因果模型^[55]。

研究表明,同侧初级运动皮层(M1)和前运动皮层之间的FC以及与 β 频段同侧M1相关的FC与功能恢复相关^[56]。前文提到电极之间的FC与运动功能状态显著相关具有作为预测中风后功能恢复指标的潜力^[51-52]。对于EC,Li等^[57]使用格兰杰因果关系分析来探索和比较运动执行和运动想象之间的EC,在运动想象期间,患者皮质运动网络的连接比对照组更紧密,并且患者在完整半球中显示出更有效的连接。有效连通性的增加表明,运动想象增强了皮质间的相互作用,促进了脑卒中患者受损半球的内部相互作用,并可能促进运动功能的恢复。另外,感觉运动皮层的功能连接也可以作为脑机接口技术(Brain Computer Interface, BCI)的控制指标进行干预训练。Biasiucci等^[58]对中风后患者使用BCI手臂功能性电刺激(FES)干预,结果显示,经BCI干预组的手臂FMA-UE评分显著增加($P=0.005$),且经BCI-FES疗法脑卒中患者的感觉运动皮层内功能连接的变化与FMA-UE评分的改善具有显著的相关性($r=0.48$, $P=0.02$),表明感觉运动皮层内的功能连接可以作为评价运动功能恢复情况的指标。

3 总结和讨论

本文综述了EEG在脑卒中运动功能评估中的应用研究,从皮质振荡活动、定量化EEG指标、脑功能连接等3个方面展开分析,最近大量研究指出EEG分析可以用于脑卒中患者运动功能评估,加深了脑卒中后功能异常及其康复机制的理解,为制订脑卒中患者的个性化康复训练方案提供重要的参考依据。以下将从3个方面对EEG在脑卒中运动功能评估中的应用进行讨论。

3.1 技术优势分析

EEG作为一种可以描述大脑活动和评估运动功能状态的工具,相较于其他方式具有成本低、使用方便、安全性高、高时间分辨率等优势。首先,EEG的低成本和非侵入式,使得对脑卒中的纵向研究更容易实现,脑卒中后的功能恢复处在动态的重塑中,对研究不同时期的脑卒中脑功能及其不同的恢复阶段大脑功能重组情况具有独特的优势;其次,EEG拥有可精确至毫秒级的高时间分辨率,因此能够实时显示康复训练中的大脑活动状态,这对于运动康复规律的研究非常关键,也易于实现自适应实时反馈式的康复策略;最后,相较于传统的量表评估方式,EEG分析技术能够提供康复评价的客观依据,为患者的康复情况提供可靠的数据支撑。然而,EEG也存在一些不足,其空间分辨率较差,对于病灶进行定位分析具有一定的局限性,且EEG作为微弱电信号,易受外界因素影响,使得对于分析处理的技术要求很高,目前针对EEG预处理的技术有很多,但都存在一些局限性,将来的研究还需要在数据处理方法上更进一步,使得EEG能够更好地应用于临床。

3.2 EEG在康复效果评价中的应用

EEG不仅可以作为测量手段,用以揭示脑卒中患者的脑功能以及恢复的神经机制,还可以作为康复效果的辅助评估及治疗手段,在重复性外周磁刺激(repetitive Peripheral Magnetic Stimulation, RPMS)、机器人辅助运动康复训练、运动想象、功能电刺激等康复措施的研究中,EEG可以为患者不同程度的干预反应提供解释信息。rPMS可以诱导感觉运动整合和提高认知能力,EEG能够揭示rPMS引起感觉运动皮层的调制过程,进而识别rPMS治疗前后的皮质活动变化^[59]。Struppler等^[60]研究指出rPMS治疗后顶叶前运动网络的激活明显增加,证明了rPMS对皮层的积极调节作用,因此在治疗期间,可以通过rPMS增强对顶叶网络的影响来提高康复效果。

脑卒中患者在运动康复过程中,脑半球之间存在失衡状态,EEG的非线性特性能够记录半球的复

杂性不对称,进而反映这种不平衡状态。机器人辅助康复训练后,覆盖大脑运动区域的中央区域上方出现了明显的不对称变化,且与FMA评分变化显著相关,表明脑卒中受试者的脑动力学变化与功能恢复直接相关^[61]。另一项研究使用脑功能连接也得到了类似的结果,随着干预训练时间的增加,这种不对称有所降低,且训练后的功能连接强度有显著增加,这将为机器人辅助康复训练的有效性提供有力的证据^[62]。因此,可以利用半球间连通性差异作为测量手段来了解机器人训练对同侧半球和对侧半球的影响。

BCI通过大脑状态提供的感觉反馈(如运动想象等),根据某些反馈程序提供匹配的感觉刺激(如功能电刺激、虚拟现实技术等),在脑卒中的辅助训练和康复治疗中取得不错的效果^[63]。经BCI干预后,辅助运动区和对侧与同侧运动皮层区域功能连接增加,表明BCI对于神经可塑性具有促进作用^[64]。与传统物理治疗方案相比,BCI干预使得Fugl-Meyer评分有显著的改善^[65]。因此,BCI干预与传统物理治疗的结合可能比单独的BCI干预提供更多的益处和功能恢复,这是因为BCI系统可以促进大脑区域和肌肉之间的功能连接,使得干预刺激和物理治疗形成正反馈。

上述研究均具有样本量偏小的特点,且数据类型呈现出多样化,如EEG通道选择不同、患者病灶位置不同及患者存在个体差异等,均可能导致研究结果的差异,另外对于不同阶段康复干预效果的研究较少。

3.3 EEG在临床决策中的应用

在相关研究中无论是皮质活动对神经可塑性的量化,还是脑功能连接情况对神经功能缺陷的描述,或者定量指标对运动功能改善的体现,这些研究均表明,EEG图有可能为临床决策提供信息并指导个体化治疗。EEG能够提高预后能力,这也是将EEG转化为常规临床实践的关键,但是EEG的加入可能会增添护理成本,因此对于临床医生和医护人员来说,EEG的预后质量和成本效益非常重要。另外,关于EEG预后效果证据的研究本质上是探索性的,由于方法学的限制,预后的潜力效果可能会被大打折扣,在实际情况中EEG数据的样本量、使用的电极数量、受试人群等变量都可能导致研究结果存在差异,EEG测量的多样性和缺乏标准化也会影响研究结论,因此需要更多严谨的方法学来确定EEG对这些结局的预测能力。

虽然存在一些限制,不可否认EEG在脑卒中临床康复中依然具有巨大的潜力。检测脑卒中患者的

EEG,研究其运动功能状态及恢复程度,有希望成为医护人员制定治疗策略的依据。EEG分析技术能够有效地描述运动恢复过程的神经可塑性变化以及评估运动功能状态,有助于了解脑卒中运动障碍的神经病理机制,提高康复训练的评价质量,对患者损伤的严重程度和恢复情况进行评价、预测,从而为制定合适的训练策略和治疗方法提供更多的参考。

4 展望

随着人工智能的发展,EEG与智能算法的结合也逐渐应用于脑卒中的康复领域,该技术的应用可以适应每个患者的个体需求,实现运动康复的早期预测,确定治疗方案的时间、预后和治疗等,从而有助于实现个性化精准医疗。另外,面对脑卒中疾病的复杂性,多模态融合多生理参数的分析方法形成趋势,如EEG与NIRS的结合,可实现时间分辨率和空间分辨率上的互补,也可根据联合检测技术研究神经血管耦合机制^[66];EEG与fMRI的结合则通过高时间分辨率和高空间分辨率的融合识别神经活动^[67];EEG与EMG融合研究脑-肌耦合效应,能为神经反馈训练系统提供理论依据等^[68]。

【参考文献】

- [1] Stinear CM, Lang CE, Zeiler S, et al. Advances and challenges in stroke rehabilitation[J]. *Lancet Neurol*, 2020, 19(4): 348-360.
- [2] 王陇德,吉训明,康德智,等.《中国卒中中心报告2020》概要[J]. *中国脑血管病杂志*, 2021, 18(11): 737-743.
- [3] Wang LD, Ji XM, Kang DZ, et al. Brief report on stroke center in China, 2020[J]. *Chinese Journal of Cerebrovascular Disease*, 2021, 18(11): 737-743.
- [4] Feigin VL, Stark BA, Johnson CO, et al. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019[J]. *Lancet Neurol*, 2021, 20(10): 795-820.
- [5] Hann RD, Limburg M, Bossuyt P, et al. The clinical meaning of Rankin 'handicap' grades after stroke[J]. *Stroke*, 1995, 26(11): 2027-2030.
- [6] Cirillo C, Brihmat N, Castel-Lacanal E, et al. Post-stroke remodeling processes in animal models and humans[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020, 40(1): 3-22.
- [7] 燕铁斌,许俭兴.脑卒中病人早期运动功能恢复的评估-FMA与MAS量表比较[J]. *神经损伤与功能重建*, 1996, 16(2): 65-67.
- [8] Yan TB, Xu JX. Assessment of early motor function recovery in stroke patients: comparison of FMA and MAS scale[J]. *Neural Injury and Functional Reconstruction*, 1996, 16(2): 65-67.
- [9] Crofts A, Kelly ME, Gibson CL. Imaging functional recovery following ischemic stroke: clinical and preclinical fMRI studies[J]. *J Neuroimaging*, 2020, 30(1): 5-14.
- [10] Sun JY, Pang RC, Chen SS, et al. Near-infrared spectroscopy as a promising tool in stroke: current applications and future perspectives[J]. *J Innov Opt Heal Sci*, 2021, 14(6): 19-41.
- [11] Vatinno A, Simpson A, Ramakrishnan V, et al. The prognostic utility of electroencephalography in stroke recovery: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(4): 255-268.
- [12] Brambilla C, Pirovano I, Mira RM, et al. Combined use of EMG and EEG techniques for neuromotor assessment in rehabilitative applications: a systematic review[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21: 7014-7039.
- [13] Paggiaro A, Birbaumer N, Cavinato M, et al. Magnetoencephalography in stroke recovery and rehabilitation[J]. *Front Neurol*, 2016, 3(7): 35-45.
- [14] 程振仕.基于EEG的脑卒中评估方法研究及病灶定位[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [15] Cheng ZS. The study of EEG-based stroke assessment methods and lesion localization[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2019.
- [16] Jackson AF, Bolger DJ. The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: a review for the rest of us[J]. *Psychophysiology*, 2014, 51(11): 1061-1071.
- [17] Acharya JN, Acharya VJ. Overview of EEG montages and principles of localization[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2019, 36(5): 325-329.
- [18] 宁聪,陈忠萍,石珍珍,等.脑组织净水摄取率在急性缺血性卒中诊断和治疗中应用的研究进展[J]. *吉林大学学报(医学版)*, 2023, 49(1): 237-243.
- [19] Ning C, Chen ZP, Shi ZZ, et al. Research progress in application of net water uptake of brain tissue in diagnosis and treatment of acute ischemic stroke[J]. *Journal of Jilin University (Medicine Edition)*, 2023, 49(1): 237-243.
- [20] Jochumsen M, Niazi IK, Mrachacz KN, et al. Comparison of spatial filters and features for the detection and classification of movement-related cortical potentials in healthy individuals and stroke patients[J]. *J Neural Eng*, 2015, 12(5): 56003.
- [21] Scholkman F, Spichtig S, Muehleemann T, et al. How to detect and reduce movement artifacts in near-infrared imaging using moving standard deviation and spline interpolation[J]. *Physiol Meas*, 2010, 31(5): 649-662.
- [22] Chang CY, Xu SH, Pion-Tonachini L, et al. Evaluation of artifact subspace reconstruction for automatic artifact components removal in multi-channel EEG recordings[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2020, 67(4): 1114-1121.
- [23] Olsen S, Signal N, Niazi IK, et al. Peripheral electrical stimulation paired with movement-related cortical potentials improves isometric muscle strength and voluntary activation following stroke[J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 5(14): 156-164.
- [24] 张博,刘璐,杨立波,等.基于时域、频域EEG(EEG)特征情感分类研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(5): 51-57.
- [25] Zhang B, Liu L, Yang LB, et al. Research on emotion classification of eeg features based on time and frequency domain[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(5): 51-57.
- [26] 李鹏海,王丽余,刘瀛涛,等.下肢运动想象和运动执行的EEG节律特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 207-214.
- [27] Li PH, Wang LY, Liu YT, et al. Study on EEG rhythm features of lower limb motor imagery and motor performance[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 207-214.
- [28] 樊宇宙. EEG数据特征提取及脑卒中发病风险分类预测研究[D].太原:太原理工大学,2021.
- [29] Fan YZ. Research on EEG data feature extraction and stroke risk classification prediction[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [30] Bonkhoff AK, Grefkes C. Precision medicine in stroke: towards personalized outcome predictions using artificial intelligence[J]. *Brain*, 2022, 145(2): 457-475.
- [31] Saeidi M, Karwowski W, Farahani FV, et al. Neural decoding of EEG signals with machine learning: a systematic review[J]. *Brain Sci*, 2021, 18(11): 1525-1536.
- [32] Roy Y, Banville H, Albuquerquie I, et al. Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review[J]. *J Neural Eng*, 2019, 16(5): 51001.
- [33] Dimyan MA, Cohen LG. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke[J]. *Nat Rev Neurol*, 2011, 7(2): 76-85.
- [34] Mads J, Cecilie R, Helene R, et al. Quantification of movement-related EEG correlates associated with motor training: a study on movement-related cortical potentials and sensorimotor rhythms[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11: 604.
- [35] Monge-Pereira E, Ibanez-Pereda J, Alguacil-Diego IM, et al. Use of electroencephalography brain-computer interface systems as a rehabilitative approach for upper limb function after a stroke: a systematic review[J]. *PM & R*, 2017, 9(9): 918-932.
- [36] 付雨桐,杨志,姚黎清.事件相关电位在脑卒中患者中的应用进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(7): 858-863.
- [37] Fu YT, Yang Z, Yao LQ. Progress on application of event-related potential in stroke patients[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36(7): 858-863.

- [30] Chen L, Mao YR, Ding MH, et al. Assessing the relationship between motor anticipation and cortical excitability in subacute stroke patients with movement-related potentials[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 881.
- [31] Peters S, Ivanova TD, Lakhani B, et al. Neuroplasticity of cortical planning for initiating stepping poststroke: a case series[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2020, 44(2): 164-172.
- [32] Yilmaz O, Cho W, Braun C, et al. Movement related cortical potentials in severe chronic stroke[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2013, 6(9): 73-76.
- [33] Xu BG, Wang Y, Deng L, et al. Decoding hand movement types and kinematic information from electroencephalogram[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2021, 29: 1744-1755.
- [34] 庄平. EEG事件相关去同步化和同步化活动与运动相关性作业[J]. *中国组织工程研究*, 2004, 8(1): 152-154.
Zhuang P. Electroencephalography event-related desynchronization and synchronization activities and movement related exercises[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2004, 8(1): 152-154.
- [35] Bartur G, Pratt H, Soroker N. Changes in mu and beta amplitude of the EEG during upper limb movement correlate with motor impairment and structural damage in subacute stroke[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(9): 1644-1651.
- [36] Chen S, Shu X, Jia J, et al. Relation between sensorimotor rhythm during motor attempt/imagery and upper-limb motor impairment in stroke[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2022, 53(3): 238-247.
- [37] Zhou L, Zhu QQ, Wu B, et al. A comparison of directed functional connectivity among fist-related brain activities during movement imagery, movement execution, and movement observation[J]. *Brain Res*, 2022, 1777: 147769.
- [38] Hallett M, Delrosso LM, Elble R, et al. Evaluation of movement and brain activity[J]. *Clin Neurophysiol*, 2021, 132(10): 2608-2638.
- [39] 石晓花, 莽靖, 徐忠信. 脑缺血再灌注损伤细胞死亡模式的研究进展[J]. *吉林大学学报(医学版)*, 2022, 48(6): 1635-1643.
Shi XH, Mang J, Xu ZX. Research progress in cell death modes of cerebral ischemia-reperfusion injury[J]. *Journal of Jilin University (Medicine Edition)*, 2022, 48(6): 1635-1643.
- [40] Rubega M, Formaggio E, Molteni F, et al. EEG fractal analysis reflects brain impairment after stroke[J]. *Entropy (Basel)*, 2021, 23(5): 592.
- [41] Bing Y, Liu JZ, Brown RW, et al. Nonlinear features of surface EEG showing systematic brain signal adaptations with muscle force and fatigue[J]. *Brain Res*, 2009, 1272: 89-98.
- [42] Cuspidada E, Machado C, Galan L, et al. QEEG prognostic value in acute stroke[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2007, 38(3): 155-160.
- [43] Sebastian-Romagosa M, Udina E, Ortner R, et al. EEG biomarkers related with the functional state of stroke patients[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 582.
- [44] Trujillo P, Mastropietro A, Scano A, et al. Quantitative EEG for predicting upper limb motor recovery in chronic stroke robot-assisted rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(7): 1058-1067.
- [45] Finnigan S, Wong A, Read S. Defining abnormal slow EEG activity in acute ischaemic stroke: delta/alpha ratio as an optimal QEEG index[J]. *Clin Neurophysiol*, 2016, 127(2): 1452-1459.
- [46] Mane R, Chew E, Phua KS, et al. Quantitative EEG as biomarkers for the monitoring of post-stroke motor recovery in BCI and tDCS rehabilitation[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2018, 7: 3610-3613.
- [47] Saes M, Meskers C, Daffertshofer A, et al. How does upper extremity Fugl-Meyer motor score relate to resting-state EEG in chronic stroke? A power spectral density analysis[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(5): 856-862.
- [48] Saes M, Zandvliet SB, Andringa AS, et al. Is resting-state EEG longitudinally associated with recovery of clinical neurological impairments early poststroke? A prospective cohort study[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(5): 389-402.
- [49] Saes M, Meskers C, Daffertshofer A, et al. Are early measured resting-state EEG parameters predictive for upper limb motor impairment six months poststroke?[J]. *Clin Neurophysiol*, 2021, 132(1): 56-62.
- [50] Zhang X, Darcy R, Chen L, et al. The feasibility of longitudinal upper extremity motor function assessment using EEG[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5487.
- [51] Hoshino T, Oguchi K, Inoue K, et al. Relationship between upper limb function and functional neural connectivity among motor related-areas during recovery stage after stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2019, 27(1): 1-10.
- [52] Hoshino T, Oguchi K, Inoue K, et al. Relationship between lower limb function and functional connectivity assessed by EEG among motor-related areas after stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2020, 28(8): 614-623.
- [53] Emmanuel C, Giulio T. Diaschisis: past, present, future[J]. *Brain*, 2014, 137(9): 2408-2422.
- [54] Friston KJ. Functional and effective connectivity: a review[J]. *Brain Connect*, 2011, 1(1): 13-36.
- [55] Friston K, Moran R, Seth AK. Analysing connectivity with Granger causality and dynamic causal modelling[J]. *Curr Opin Neurobiol*, 2013, 23(2): 172-178.
- [56] Philips GR, Daly JJ, Principe JC. Topographical measures of functional connectivity as biomarkers for post-stroke motor recovery[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(67): 1-16.
- [57] Li W, Zhang J, Zhang Y, et al. Conditional granger causality analysis of effective connectivity during motor imagery and motor execution in stroke patients[J]. *Biomed Res Int*, 2016, 4: 3870863.
- [58] Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 2421.
- [59] Chen S, Li Y, Shu X, et al. electroencephalography mu rhythm changes and decreased spasticity after repetitive peripheral magnetic stimulation in patients following stroke[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 546599.
- [60] Struppler A, Binkofski F, Angerer B, et al. A fronto-parietal network is mediating improvement of motor function related to repetitive peripheral magnetic stimulation: a PET-H2O15 study[J]. *Neuro Image*, 2007, 36(2): 174-186.
- [61] Khan A, Chen C, Yuan K, et al. Changes in electroencephalography complexity and functional magnetic resonance imaging connectivity following robotic hand training in chronic stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2021, 28(4): 276-288.
- [62] Zappasodi F, Olejarczyk E, Marzetti L, et al. Fractal dimension of EEG activity senses neuronal impairment in acute stroke[J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100199.
- [63] 王坤. 脑-机接口中运动意图诱发EEG响应的关键特征强化与识别[D]. 天津: 天津大学, 2020.
Wang K. Enhancement and recognition of electroencephalography features induced by movement intention for brain-computer interfaces[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [64] Ang KK, Guan C, Chua KS, et al. Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010, 2010: 5549-5552.
- [65] Ang KK, Guan C, Phua KS, et al. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke[J]. *Front Neuroeng*, 2014, 7(30): 1-9.
- [66] 欧朗, 赵越, 李晓欧. NIRS-EEG联合检测技术在脑功能分析中的研究进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2020, 37(10): 1323-1329.
Ou L, Zhao Y, Li XO. Advances of near infrared spectroscopy combined with electroencephalogram in brain function analysis[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2020, 37(10): 1323-1329.
- [67] Bezmaternykh DD, Kalgin KV, Maximova PE, et al. Application of fMRI and simultaneous fMRI-EEG neurofeedback in post-stroke motor rehabilitation[J]. *Bull Exp Biol Med*, 2021, 171(3): 379-383.
- [68] Averta G, Barontini F, Catrambone V, et al. U-Limb: a multi-modal, multi-center database on arm motion control in healthy and post-stroke conditions[J]. *Gigascience*, 2021, 10(6): 1-17.

(编辑:陈丽霞)